

**Ф. Н. Сарапулов**

**ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» (г. Екатеринбург, Россия)**

**А. Ю. Петров, С. М. Фаткуллин**

**ООО «РЭЛТЕК» (г. Екатеринбург, Россия)**

**П. Шымчак**

**Западнопоморский технологический университет (г. Щецин, Польша)**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВЕ ЕГО СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ**

В работе рассматривается математическая модель индукционного нагревателя цилиндрических заготовок на основе электрических, магнитных и тепловых схем замещения [1, 2, 3]. Математические процедуры реализованы в пакете Mathcad и не требуют больших вычислительных ресурсов. С этих позиций модель может успешно конкурировать с другими численными моделями, например [4, 5], а также основанными на методе конечных элементов (Comsol Multiphysics, Elcut и др.), успешно применяемыми в инженерной практике.

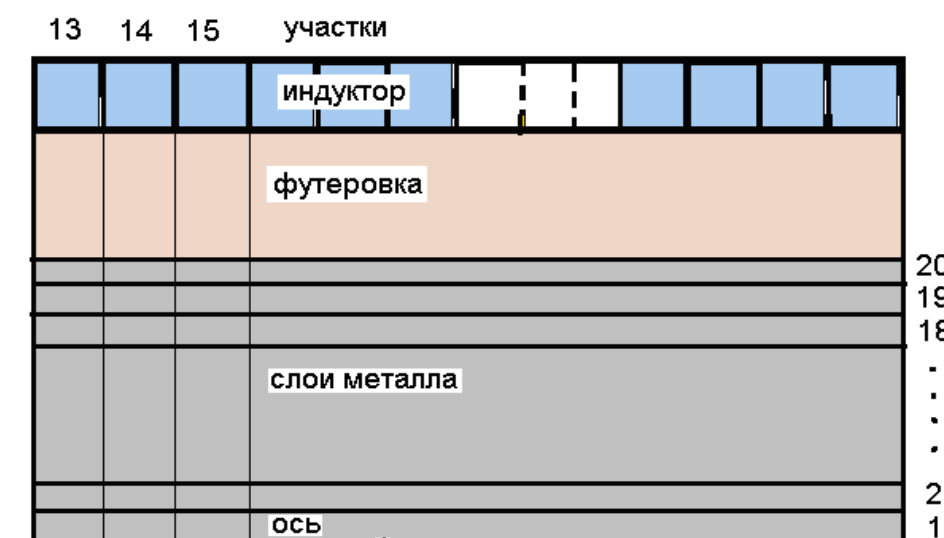


Рис.1. Общий вид индуктора с загрузкой без обратного магнитопровода

В качестве примера был рассмотрен процесс нагрева цилиндрической стальной заготовки диаметром 0.13 м, длиной индуктора 2 м и его внутренним диаметром 0.2 м. На рис.1 схематично показано продольное сечение нагревателя без обратного магнитопровода. При построении детализированной магнитной схемы замещения выделено 56 участков по длине в соответствии с количеством витков в обмотке индуктора и 24 участка в левой и правой краевых зонах. По радиусу установки выделено 30 слоев, включая зону обратного замыкания магнитного потока за пределами индуктора. Для электрических и магнитных схем замещения нагревателя в соответствии с [2, 3] записываются матричные уравнения электрического и магнитного равновесия.

Поскольку мощность в заготовке распределяется равномерно по ее длине, а тепловая проводимость участков слоя по радиусу гораздо больше проводимости по длине (толщина слоя много меньше его ширины), можно принять, что каждый слой

заготовки имеет одинаковую температуру по длине. Тогда в эквивалентной тепловой схеме можно ввести тепловые массы каждого слоя в целом (без детализации по длине слоя). Это существенно упрощает алгоритм и уменьшает время расчетов.

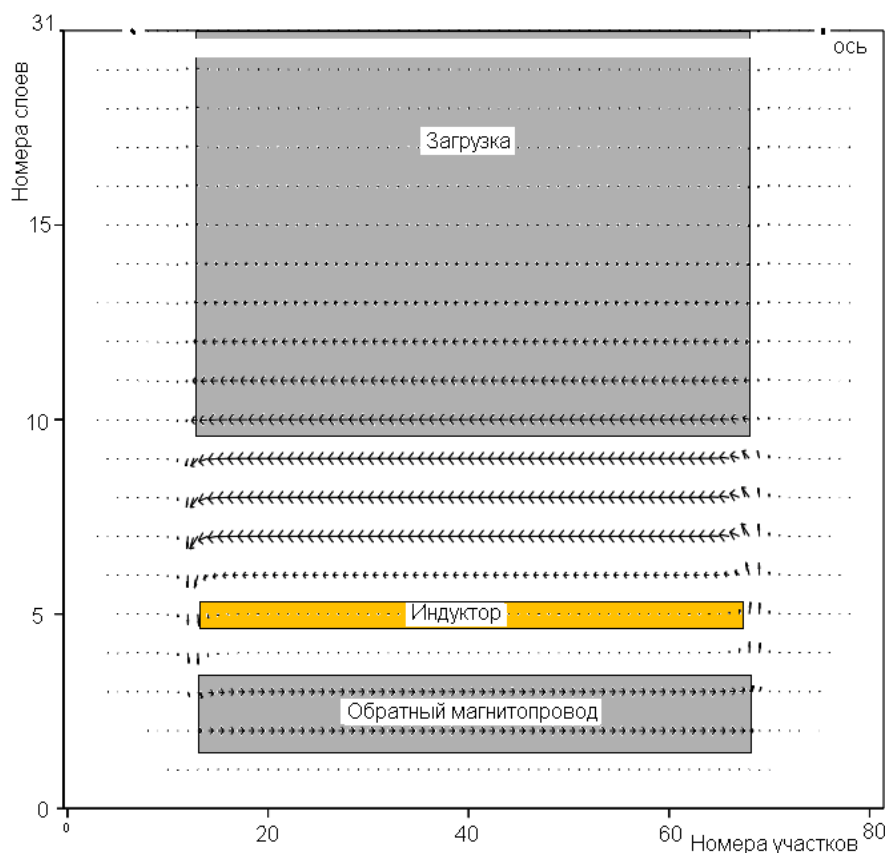


Рис. 2. Распределение магнитной индукции в сечении нагревателя

На рис. 2 приведена картина распределения магнитной индукции в сечении нагревателя при наличии обратного магнитопровода. Видно, что магнитное поле сосредоточено преимущественно в верхних слоях заготовки, футеровке между заготовкой и индуктором, а также в обратном магнитопроводе.

В таблице 1 приведены результаты расчета основных показателей нагревателя. Нагрев осуществлялся с температуры заготовки 760 °С. Удельное сопротивление материала среды задавалось в виде

$$\rho_2 = 9.57 \cdot 10^{-8} \left[ 1 + 0.0086 \cdot (T_t - 20) \right] \quad (1)$$

Таблица

Параметр \ Вариант	Без обратного магнитопровода	С обратным магнитопроводом
Мощность полная, кВА	132 + j 890	176 + j 1086
Коэффициент мощности, о.е.	0.147	0.16
Потери мощности в индукторе, кВт	24	24
Активная мощность в нагрузке, кВт	108	152
КПД нагревателя, о.е.	0.637	0.727
Плотность тока, А/ мм <sup>2</sup>	30	30

Из анализа таблицы следует, что при наличии обратного магнитопровода активная мощность в загрузке и КПД нагревателя увеличиваются почти в полтора раза по сравнению с вариантом нагревателя без обратного магнитопровода.

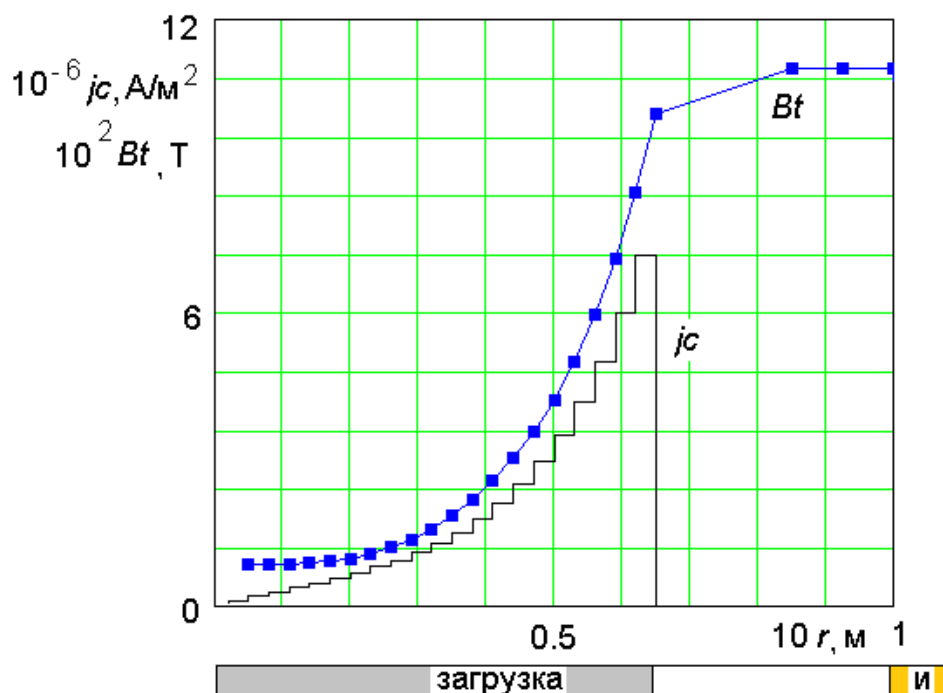


Рис. 3. Кривые распределения индукции  $Bt$  и плотности тока  $jc$  по радиусу

На рис. 3 приведены зависимости магнитной индукции и плотности тока от радиуса (от центра загрузки до внутренней поверхности индуктора «и»). Можно видеть, что магнитная индукция в слоях тепловой изоляции изменяется незначительно. Внутри нагреваемой заготовки магнитная индукция и плотность индуцированного тока изменяются существенно, затухая к центру.

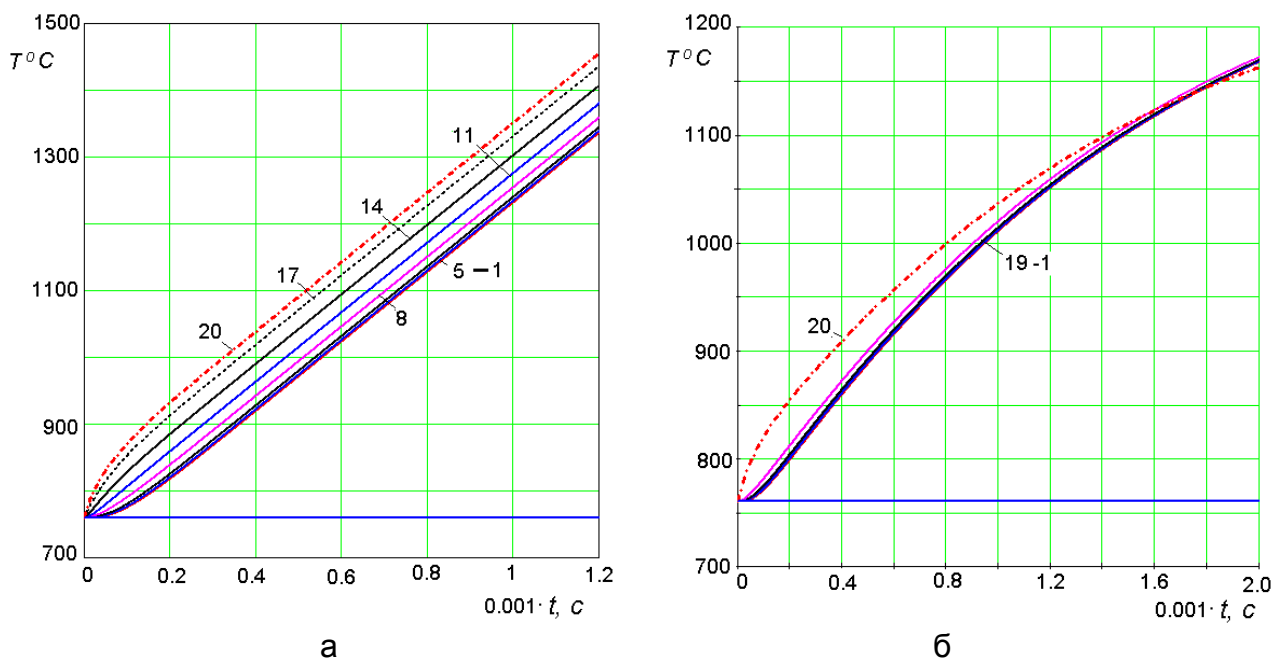


Рис. 4. Кривые нагрева слоев заготовки при наличии (а) и отсутствии (б) слоя теплоизоляции между индуктором и загрузкой

Рис. 4а показывает, что при нагреве заготовки с тепловой изоляцией в зазоре поверхностные слои нагреваются быстрее. Требуется определенная выдержка времени для выравнивания температуры по радиусу заготовки. При устранении тепловой изоляции между индуктором и заготовкой теплопередача излучением с поверхности заготовки на водоохлаждаемый индуктор существенно увеличивает тепловую проводимость от заготовки к индуктору и резко снижает эффективность нагрева заготовки (рис.4б). В этом случае эффективность можно повысить путем установки теплового экрана между индуктором и заготовкой (в расчете это учитывается устранением теплопроводности излучением с поверхности заготовки на индуктор в системе тепловых уравнений).

На этапе нагрева заготовки в диапазоне температур до точки Кюри электромагнитная задача становится нелинейной. В этом случае зависимость магнитной проницаемости стального слоя от магнитной индукции и температуры задается выражением [8]

$$f_4(z) = 1 + (f_2(z) - 1) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T_i}{750} \right)^2 \right], \quad (2)$$

которое соответствует кривой намагничивания стали для температуры  $T_i = 20^\circ \text{C}$ .

Задача решается методом последовательных приближений, в большинстве случаев достаточным является 12-15 итераций.

#### Список использованных источников

1. Лузгин В.И. Плавильные комплексы на основе индукционных тигельных печей и их математическое моделирование: Учебное пособие / В.И. Лузгин, С.Ф. Сарапулов, Ф.Н. Сарапулов, Б.А. Сокунов, Д.Н. Томашевский, В.Э. Фризен, И.В. Черных, В.В. Шипицын. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005г. 464 с.
2. Гоман В.В. Структурное моделирование тепловых процессов в электротермических установках: учебное пособие / В.В. Гоман, С.М. Мезенин, В.А. Прахт, С.Ф. Сарапулов, Ф.Н. Сарапулов, С.А. Федореев; под общ. ред. Ф.Н. Сарапулова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 343 с.
3. Петров А.Ю. Система индукционного нагрева трубных заготовок и формирование эффективных режимов ее работы: Дис.... канд техн. наук. Екатеринбург, 2007–196 с.
4. Luzgin V.I. Modeling Induction Heating of a Composite Billet // Luzgin V.I., Petrov A.Yu., Prakht V.A., Sarapulov F.N., Frizen V. E. Proceedings Of International Simposium on Heating by electromagnetic Sources. –Italy, 2007. – P. 341–348
5. Прахт В.А. Компьютерная программа проектирования установки индукционного нагрева движущихся трубных заготовок / В.А. Прахт, А.Ю. Петров, Ф.Н. Сарапулов. - Промышленная энергетика, 2010, № 5, С. 34-37.
6. Немков В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович – Л.: Энергоатомиздат, 1988 – 256 с.
7. Демидович В.Б. Теория, исследование и разработка индукционных нагревателей для металлургической промышленности. Дис. ... докт. техн. наук: 05.09.10 – СПб., 2002 – 316 с.
8. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали / А.Б. Кувалдин. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 200 с.